

## VI. Reutilización de aguas residuales urbanas

GLORIA GARRAFÓN LAFUENTE



Doctora en Ciencias Químicas. En 1991 se incorporó a la empresa Cadagua, S. A., perteneciente al grupo Ferrovial Agromán, dedicada a la ingeniería, construcción y mantenimiento de plantas para el tratamiento y depuración de aguas. Desde 1997 realiza su actividad en el Departamento de I+D, como investigador principal.

El agua es un factor indispensable para la vida y determinante para el desarrollo de la sociedad, no imaginándonos cómo las grandes civilizaciones de la antigüedad podían haber conseguido tal grado de desarrollo si su existencia no hubiera estado ligada al discurrir de los ríos que cruzaban sus territorios. En la actualidad, las diferentes actividades humanas precisan agua en cantidad creciente con unos requerimientos de calidad cada vez más restrictivos. Satisfacer estas necesidades resulta difícil, debido al desequilibrio entre la demanda y los recursos, por lo cual se debe trabajar en dos direcciones:

- Disminuir la demanda, mejorando la gestión reduciendo las pérdidas en las redes de distribución y mediante campañas de concienciación social.
- Aumentar la oferta, aplicando nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas.

En esta situación, el agua residual urbana se ha convertido en un recurso hídrico con posibilidades de empleo en numerosos campos. Su recuperación debe considerarse como una etapa más dentro del ciclo del uso del agua que permita disponer de un nuevo recurso hídrico y conservar otros de mayor calidad para usos más exigentes. Sin embargo, en este nuevo escenario, debe prestarse especial atención a su calidad fisicoquímica y microbiológica para evitar en todo momento daños a la salud pública y al medio.

Desde la aparición en 1914 del sistema de fangos activos desarrollado por Arden y Lockett, los tratamientos aplicados en la depuración de aguas residuales

urbanas emplean dicha tecnología como tratamiento secundario. A lo largo de los años esta tecnología ha sufrido numerosas modificaciones, buscando mejorar la eficacia en cuanto a la eliminación de materia orgánica y nutrientes (fósforo y nitrógeno), reducir el espacio requerido por la instalación o los costes económicos derivados del proceso, sin quedar resueltos los aspectos sanitarios. Durante estos tratamientos hay una reducción de los microorganismos en el efluente tratado (Tabla 1), pero no la adecuada para su reutilización. Todo ello ha dado lugar al desarrollo de nuevas tecnologías que hoy día se aplican como tratamiento adicional denominado genéricamente terciario.

TABLA 1. *Porcentajes de eliminación de microorganismos en el tratamiento convencional de aguas residuales (1)*

<i>Microorganismo</i>	<i>Tratamiento primario</i>	<i>Fangos activos</i>	<i>Biofiltro</i>
Coliformes fecales	<10	0-99	85-99
Salmonella	0-15	70-99+	85-99+
Mycobacterium tuberculosis	40-60	5-90	65-99
Shigella	15	80-90	85-99
Entamoeba histolytica	0-50	Limitado	Limitado
Huevos de Helminto	50-98	Limitado	60-75
Virus entéricos	Limitado	75-99	0-85

Son varias las aplicaciones que se puede dar al agua residual depurada, tales como la reutilización agrícola y forestal, usos industriales, servicios públicos (incendios, lavado de calles y automóviles), usos ornamentales y recreativos, mejora y preservación del medio natural y recarga de acuíferos, cada uno de los cuales exige una calidad determinada para que la reutilización sea segura.

## REGLAMENTACIÓN

Actualmente existen distintas normativas para regular el uso de aguas residuales, entre las que se encuentra las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (2), donde se insiste en la necesidad de controlar parámetros de tipo microbiológico, como son los coliformes fecales y los nemátodos. Estas recomendaciones (Tabla 2) han sido consideradas con diferentes variaciones a través de todo el planeta.

A nivel europeo, la única reglamentación sobre esta materia es la declaración del artículo 12 de la Directiva sobre Aguas Residuales (3): «*Las aguas residuales tratadas deberán reutilizarse cuando sea adecuado*». A pesar de esto, pocos esta-

dos miembros de la UE tienen estándares y reglamentaciones integrales para la reutilización de aguas residuales.

TABLA 2. *Parámetros de Calidad Microbiológica Recomendados para la Reutilización de Aguas Residuales en la Agricultura (2)<sup>a</sup>*

<i>Cate- goría</i>	<i>Reutilización aplicada</i>	<i>Grupos expuestos</i>	<i>Nematodos Intestinales<sup>b</sup> (media aritmética del número de huevos por litro<sup>c</sup>)</i>	<i>Coliformes Fecales (media geométrica del número de coliformes por cada 100 ml<sup>c</sup>)</i>	<i>Tratamiento de aguas residuales para llegar a la calidad microbiológica requerida</i>
<b>A</b>	Riego de cultivos de productos que se consumen sin cocinar, de campos de deporte y de parques públicos	Trabajadores, consumidores y público	$\leq 1$	$\leq 1000^d$	Una serie de lagunas de estabilización para conseguir la calidad microbiológica indicada o tratamiento equivalente
<b>B</b>	Riego de cultivos de Cereales y especies industriales, forrajes, pastos y árboles <sup>e</sup>	Trabajadores	$\leq 1$	Sin estándares recomendables	Retención en lagunas de estabilización durante 8-10 días o eliminación equivalente de helmintos y coliformes fecales
<b>C</b>	Riego localizado de cultivos de la categoría B cuando no haya exposición de público y trabajadores	Ninguno	No aplicable	No aplicable	Pretratamiento, dependiendo del sistema de riego.

<sup>a</sup> En determinados casos hay que tener en cuenta la epidemiología local y los factores ambientales, socioculturales; modificando las directrices conforme estos.

<sup>b</sup> *Ascaris*, *Trichuris* y anquilostoma.

<sup>c</sup> Durante el período de riego.

<sup>d</sup> Conviene establecer una directriz más estricta ( $\leq 200$  CF/100 ml) para zonas públicas en las que la población puede entrar en contacto directo.

<sup>e</sup> En el caso de árboles frutales, el riego se tiene que interrumpir dos semanas antes de la cosecha del fruto y no se ha de recoger ningún fruto del suelo. No se ha de utilizar el riego por aspersión.

La situación de España se caracteriza por tener un déficit hídrico en gran parte de su territorio, lo que conlleva a una búsqueda de nuevos recursos entre los que destaca las aguas residuales urbanas.

Hoy día se trabaja en la elaboración de una nueva normativa destinada a la reutilización de aguas residuales dentro del territorio Español. Se sabe de la existencia de la *Propuesta de Calidades Mínimas Exigidas para la Reutilización Directa de efluentes Depurados Según los Distintos Usos Posibles, así como Aspectos Relativos a la Metodología, Frecuencia de Muestreo y Criterios de Cumplimiento de los Análisis Establecidos, para Incluir en una Normativa de Carácter Estatal*, que ha sido preparada por el Ministerio de Medio Ambiente (4). En dicho documento se reflejan las calidades mínimas exigidas para la reutilización de efluentes depurados en función de los distintos usos, incluyéndose dos cuadros:

- Cuadro I: Estándares de calidad biológicos y físico-químicos en función de los distintos usos (Tabla 3).
- Cuadro II: Límites sobre parámetros tóxicos para los usos de riego agrícola (Tabla 4).

TABLA 3. *Propuesta de Criterios Físico-Químicos y Biológicos mínimos obligatorios de Calidad a conseguir en el Agua Residual Depurada a Reutilizar*

Uso del Agua Residual Tratada	Criterios de Calidad				
	Biológica	Físico-Química	Otros Criterios		
	Huevos de Nemátodos	E. coli	Sólidos en Suspensión	Turbidez	
Usos domiciliarios: riego de jardines privados, descarga de aparatos sanitarios, sistemas de calefacción y refrigeración de aire domésticos y lavado de vehículos	< 1 huevo/ 10 l	0 ufc/ 100 ml	< 10 mg/l	< 2 NTU	
Usos y Servicios Urbanos: Riego de zonas verdes de acceso público(campos deportivos, parques públicos) baldeo de calles, sistemas contra incendios, fuentes y láminas ornamentales	< 1 huevo/ l	<200 ufc/ 100 ml	< 20 mg/l	< 5 NTU	

TABLA 3. *Propuesta de Criterios Físico-Químicos y Biológicos mínimos obligatorios de Calidad a conseguir en el Agua Residual Depurada a Reutilizar (cont.)*

Uso del Agua Residual Tratada	Criterios de Calidad				
	Biológica		Físico-Química		Otros Criterios
	Huevos de Nemátodos	E. coli	Sólidos en Suspensión	Turbidez	
Cultivos de invernaderos	< 1 huevo/ l	<200 ufc/ 100 ml	< 20 mg/l	< 5 NTU	<i>Legionella pneumophila</i> 0 ufc/100 ml
Riego de cultivos para consumo en crudo. Frutales regados por aspersión	< 1 huevo/ l	<200 ufc/ 100 ml	< 20 mg/l	< 5 NTU	
Riego de pastos para consumo de animales productores de carne o leche	< 1 huevo/ l	< 1.000 ufc/100 ml	< 35 mg/l	Sin límite fijado	<i>Taenia saginata</i> y <i>solium</i> < 1 huevo/l
Riego de cultivos destinados a industrias conserveras y productos que no se consuman crudos. Riego de frutales excepto por aspersión	< 1 huevo/ l	< 1.000 ufc/ 100 ml	< 35 mg/l	Sin límite fijado	
Riego de cultivos industriales, viveros, forrajes ensilados, cereales, semillas, oleaginosas	< 1 huevo/ l	< 10.000 ufc/ 100 ml	< 35 mg/l	Sin límite fijado	
Riego de bosques, industria maderera, zonas verdes y de otro tipo no accesible al público	< 1 huevo/ l	Sin límite fijado	< 35 mg/l	Sin límite fijado	
Refrigeración industrial, excepto industria alimentaria	< 1 huevo/ l	< 10.000 ufc/ 100 ml	< 35 mg/l	Sin límite fijado	<i>Legionella pneumophila</i> 0 ufc/100 ml

TABLA 3. *Propuesta de Criterios Físico-Químicos y Biológicos mínimos obligatorios de Calidad a conseguir en el Agua Residual Depurada a Reutilizar (cont.)*

Uso del Agua Residual Tratada	Criterios de Calidad				
	Biológica		Físico-Química		Otros Criterios
	Huevos de Nemátodos	E. coli	Sólidos en Suspensión	Turbidez	
Estanques, masas de agua y caudales circulantes, de uso recreativo en las que está permitido el contacto del público con el agua (excepto baño)	< 1 huevo/ l	< 200 ufc/ 100 ml	< 35 mg/l	Sin límite fijado	
Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el contacto del público con el agua	Sin límite fijado	Sin límite fijado	Sin límite fijado	Sin límite fijado	
Acuicultura (biomasa vegetal o animal)	< 1 huevo/ l	< 1.000 ufc/ 100 ml	< 35 mg/l	Sin límite fijado	
Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno	< 1 huevo/ l	< 1.000 ufc/ 100 ml	< 35 mg/l	Sin límite fijado	Nitrógeno total < 50 mg/l
Recarga de acuíferos por inyección directa	< 1 huevo/10 l	< 0 ufc/ 100 ml	< 10 mg/l	<2 NTU	Nitrógeno total < 15 mg/l

TABLA 4. *Concentración máxima admisible de los metales en el agua residual depurada que se vaya a reutilizar*

Elemento constituyente	Concentración máxima admisible (mg/l)	Elemento constituyente	Concentración máxima admisible (mg/l)
Aluminio	20	Plomo	10,0
Arsénico	2,0	Litio	2,5
Berilio	0,5	Manganeso	10,0
Boro	2,0	Molibdeno	0,05

TABLA 4. *Concentración máxima admisible de los metales en el agua residual depurada que se vaya a reutilizar (cont.)*

<i>Elemento constituyente</i>	<i>Concentración máxima admisible (mg/l)</i>	<i>Elemento constituyente</i>	<i>Concentración máxima admisible (mg/l)</i>
Cadmio	0,05	Níquel	2,0
Cobalto	5,0	Selenio	0,02
Cobre	5,0	Vanadio	1,0
Cromo	1,0	Zinc	10,0
Flúor	15,0	Volframio, Titanio,	Tolerancia
Hierro	20,0	Estaño	desconocida

## CONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL AGUA RESIDUAL

Los principales agentes infecciosos para el ser humano y los animales que pueden encontrarse en el agua residual se clasifican en cinco grandes grupos:

### 1. Bacterias

La materia fecal contiene más de  $10^{12}$  bacterias por gramo (5), lo que puede representar cerca del 9% del peso en seco. El alto contenido de bacterias en el agua residual urbana hace que los procesos biológicos sean los más adecuados para el tratamiento de este tipo de efluentes, ya que así se aprovecha su metabolismo, sin embargo, entre las bacterias presentes aparecen diversas especies de patógenos humanos o de animales capaces de causar infecciones (Tabla 5).

TABLA 5. *Bacterias potencialmente presentes en aguas residuales domesticas no tratadas (6)*

<i>Organismo</i>	<i>Enfermedad</i>
<i>Escherihria coli</i>	Gastroenteritis
<i>Leptospira (spp.)</i>	Leptospirosis
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
<i>Salmonella</i> (2100 serotipos)	Salmonelosis
<i>Shigella</i> (4spp.)	Shigellosis (disenteria bacilar)
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera

## 2. Virus

A diferencia de las bacterias, los virus no se encuentran normalmente en las heces del hombre. Sólo están presentes en el tracto gastrointestinal de individuos que han sido afectados. A través del agua se pueden transmitir al hombre más de 140 virus que corresponden a los virus entéricos eliminados por las heces de las personas infectadas. Los más comunes son los virus causantes de gastroenteritis y el virus de la hepatitis. Algunos de estos virus (rotavirus, virus Norwalk) no generan una protección inmunitaria a largo plazo por lo que la infección puede repetirse varias veces a lo largo de la vida (Tabla 6).

TABLA 6. *Virus potencialmente presentes en aguas residuales domesticas no tratadas (6)*

<i>Microorganismo</i>	<i>Enfermedad</i>
Virus entéricos	Gastroenteritis, anomalías del corazón y meningitis
Hepatitis A	Hepatitis de tipo infeccioso
Agente de Norwalk	Gastroenteritis
Rotavirus	Gastroenteritis

## 3. Protozoos

El quiste es relativamente resistente a la inactivación por medio de los tratamientos convencionales del agua residual. En los últimos años se ha dado gran importancia a la contaminación por *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*, protozoos considerados patógenos emergentes, por lo cual, la investigación en el caso de contaminación de las aguas se ha orientado básicamente a su detección a nivel de laboratorio y al estudio de procesos de desinfección que garanticen la eliminación de los mismos (Tabla 7).

TABLA 7. *Protozoos infecciosos potencialmente presentes en aguas residuales domesticas no tratadas (6)*

<i>Microorganismo</i>	<i>Enfermedad</i>
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Cryptosporidiasis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amebica)
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis



#### 4. Helmintos

Las características epidemiológicas que hacen de los helmintos patógenos entéricos causantes de infección por contacto con agua contaminada, son su alta persistencia en el medio ambiente, la mínima dosis infecciosa, la baja respuesta inmune y la capacidad de permanecer en el suelo largos periodos de tiempo (Tabla 8).

TABLA 8. *Agentes infecciosos potencialmente presentes en aguas residuales domesticas no tratadas (6)*

<i>Microorganismo</i>	<i>Enfermedad</i>
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis
<i>Taenia solium</i>	Teniasis
<i>Trichuris trichiura</i>	Tricuriasis

#### 5. Hongos

Los hongos suelen estar presentes en el agua residual jugando un papel importante como saprofitos, aunque no se presentan en un alto porcentaje. Entre los diferentes hongos presentes en las aguas residuales pueden encontrarse patógenos capaces de causar afecciones de piel, mucosas, pelo o uñas (Tabla 9).

TABLA 9. *Principales hongos patógenos presentes en las aguas residuales*

<i>Microorganismo</i>	<i>Enfermedad</i>
<i>Candida albicans</i>	Candidiasis
<i>Cryptococcus neoformans</i>	Criptococosis
<i>Aspergillus spp.</i>	Aspergilosis
<i>Trichophyton spp.</i>	Tinea
<i>Epidermophyton spp.</i>	Tinea

#### 6. Indicadores de Contaminación Fecal (ICF)

El control de la calidad microbiológica del agua de consumo y vertido, requiere una serie de análisis dirigidos a determinar la presencia de microorganismos patógenos para su diagnóstico se precisan laboratorios especializados, varios días de análisis y costos elevados. Como alternativa se ha propuesto como método de detección de patógenos en aguas residuales el uso de indicadores microbianos (*Indicadores de Contaminación Fecal ICF*) que presentan un com-

portamiento similar a los patógenos y que se pueden identificar mediante el empleo de métodos sencillos, rápidos y económicos. Una vez se ha evidenciado la presencia de ICF se puede deducir que existe la posibilidad de que microorganismos patógenos se encuentren presentes en la misma concentración y que su comportamiento frente a diferentes factores como pH, temperatura, presencia de nutrientes, tiempo de retención hidráulica o sistemas de desinfección es similar a la del indicador.

A continuación se indican los requisitos que debe tener un microorganismo para ser un Indicador de Contaminación Fecal:

- Ser un constituyente normal de la flora intestinal de individuos sanos y estar presente, de forma exclusiva, en las heces de animales homeotérmicos.
- No debe ser patógeno, pero debe coexistir con ellos.
- Estar presente en número superior al de patógenos pero existiendo una buena correlación entre ambos.
- Ser incapaces de reproducirse en el agua pero estar vivos y ser posible su cultivo en condiciones ambientales específicas.
- Tiempo de supervivencia igual o ligeramente superior al de los patógenos, es decir, ser más resistentes que estos a las condiciones ambientales y a los procesos de desinfección.
- Facilidad de aislamiento, cuantificación e identificación, no dando falsos positivos.

No existe ningún microorganismo que cumpla todos los requisitos, por lo que se eligen aquellos que más se aproximan. Así los ICF clásicos han sido microorganismos de la flora saprofita del intestino que se encuentran de forma abundante y en el mayor número de individuos.

Las bacterias que se encuentran con mayor frecuencia en el agua son las bacterias entéricas que colonizan el tracto gastrointestinal del hombre y son eliminadas a través de la materia fecal. Cuando estos microorganismos se introducen en el agua, las condiciones ambientales son muy diferentes y por consiguiente su capacidad de reproducirse y de sobrevivir son limitadas. Debido a que su detección y recuento a nivel de laboratorio son lentos y laboriosos se ha buscado un grupo alternativo de indicadores que sean de más rápida y fácil detección. El grupo más utilizado es el de las bacterias coliformes.

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana debido a:

- Son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente.
- Están presentes en el tracto gastrointestinal en grandes cantidades.

- Permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas.
- Se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección.

Los coliformes fecales son termotolerantes, ya que son capaces de tolerar temperaturas elevadas, siendo esta característica la que les diferencia de los coliformes totales. Para aguas superficiales o para evaluar la eficiencia de una EDAR deben usarse los coliformes fecales. Solamente se emplearán los coliformes totales si no hay condiciones para evaluar los fecales.

La aplicación de ICF de origen bacteriano no es suficiente para asegurar la presencia o no de patógenos pertenecientes a otros grupos (virus, protozoos o nemátodos). Así puede haber presencia de diferentes tipos de virus en muestras de agua en total ausencia de coliformes, de tal modo que el control de coliformes no es suficiente para el asesoramiento de la calidad sanitaria del agua residual tratada, siendo únicamente un referente sobre el comportamiento de las bacterias patógenas.

Los virus tienen capacidad de causar infección a bajas concentraciones, algunos de los cuales son más resistentes a la desinfección que los coliformes por lo que los indicadores habituales de contaminación bacteriana no evalúan de manera eficiente sobre su presencia o ausencia en el agua. En el campo medioambiental, existe un virus que se emplea como indicador de contaminación fecal es el Colifago somático.

Se han propuesto dos tipos de fagos: colifagos somáticos y colifagos F específicos debido a las siguientes propiedades:

- Los fagos se encuentran abundantemente en agua residual y contaminada.
- Las poblaciones de colifagos son mucho más grandes que las de enterovirus.
- Los colifagos son incapaces de reproducirse fuera del huésped bacteriano.
- Los colifagos se pueden aislar y contar por métodos sencillos.
- Se obtienen resultados más rápidos cuando se analizan colifagos que cuando se trabaja con enterovirus.
- Algunos colifagos son tan resistentes como los enterovirus a los procesos de desinfección.

Los colifagos están presentes en cantidades bajas en las heces humanas y en animales homeotérmicos, pero están en número elevado en aguas residuales. Estarán en aguas que contienen *E. coli* y por tanto serán ICF.

El estudio de huevos de helminto a nivel ambiental ha hecho necesaria la selección de un parásito indicador debido a las limitaciones en su detección a

nivel de laboratorio, habiendo sugerido el *Ascaris lumbricoides* como un buen indicador del comportamiento de aquellos. Sus ventajas son:

- Persiste en el medio ambiente por muchos meses, pero no se multiplica.
- Se puede identificar fácilmente.
- El índice de parasitismo a nivel mundial es muy alto.
- El riesgo de transmisión es alto debido a la alta concentración de huevos que se puede encontrar.

## CONTAMINACIÓN QUÍMICA DEL AGUA RESIDUAL

Los principales problemas que se plantean a nivel de reutilización del agua residual son consecuencia del elevado contenido de microorganismos patógenos, por lo cual la mayoría de los tratamientos terciarios están enfocados a eliminar o retener estas unidades infectivas. Sin embargo, el agua residual contiene una amplia gama de contaminantes químicos a los cuales también hay que prestar especial atención antes de su reutilización.

### 1. Disruptores hormonales

Dentro de los diferentes grupos de contaminantes químicos presentes en el agua residual aparece un conjunto heterogéneo que presenta como principal efecto adverso el tener actividad estrogénica (7). Este grupo de compuestos está constituido por una amplia gama de sustancias químicas, tales como los estrógenos naturales, pesticidas organoclorados, alquilfenoles y derivados, bifenilos policlorados, así como determinados plásticos y polímeros sintéticos dentro de los cuales destacan los derivados del bisfenol y del ftalato, con la denominación genérica de disruptores hormonales.

Estas sustancias llegan a los seres vivos por su presencia en la descarga de efluentes tratados a masas de agua que posteriormente se destinan al consumo humano o indirectamente a través de su reutilización en la recarga de acuíferos (8). Otro punto a considerar es el consumo humano de estas sustancias a través de la cadena trófica, ya que su presencia en determinados animales, que posteriormente se consumen, puede dar lugar a una acumulación en el organismo (9), como es el caso de la acuicultura o en el riego de pastos para consumo de animales productores de carne o leche.

La presencia de estos compuestos en el agua residual produce diversos efectos medio ambientales, provocando problemas de salud debido a su consumo, tales como cáncer testicular y de mama, afecciones en la reproducción, alteraciones genéticas, malformaciones congénitas y efectos neurológicos entre

otros (10, 11, 12, 13, 14). También se ha asociado con alteraciones en el porcentaje de sexos, con tendencia hacia la feminización de la especie, debido a que mimetizan la acción de los estrógenos o antagonizan la acción de los andrógenos (15). Este tipo de problemas afectan tanto al ser humano como a otras especies del reino animal.

La presencia de contaminantes químicos en las aguas es un problema de salud pública y medioambiental que hoy día se debate entre científicos, sector industrial y organizaciones medioambientales. Así, la Unión Europea ya ha incluido algunas sustancias de este grupo en una lista prioritaria para prevenir los problemas de contaminación que de ellas se derivan (16).

Los derivados del bisfenol (Bisfenol A, Bisfenol F) y del ftalato son ampliamente utilizados en diversos materiales y productos de uso doméstico lo que hace que aparezcan en las aguas residuales en mayor o menor concentración, siendo el principal aporte de estos compuestos los vertidos industriales (17). Las concentraciones de los mismos varía mucho, según se observa en la Tabla 10, donde se refleja los valores correspondientes al Bisfenol A.

TABLA 10. *Concentraciones de Bisfenol A ( $\mu\text{g/l}$ ) en diferentes muestras de agua. Adaptado de (17) y (18)*

<i>Muestra</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Medio</i>
Industria Metalúrgica	2,6	35	17
Industria Química	2,5	50	18
Industrial Papelera	28	72	41
Industrial Alimentaria	nd	3,8	2,1
Agua Residual Urbana	10	37	21
Efluente Tratado EDAR	n.d.	2,5	1,5
Lixiviado de vertedero	0,8	17.200	2.320
Aguas superficiales	n.d.	0,88	0,09

(n.d.) no detectado.

En una EDAR, la concentración de los derivados del bisfenol y del ftalato puede reducirse por doble vía, mediante mecanismos de adsorción a la materia particulada (19) con la consiguiente acumulación en los fangos, o por transformación biológica dependiente del tiempo de retención celular (20). Con todo ello, no se puede garantizar la ausencia de disruptores hormonales en los efluentes, siendo las bajas concentraciones remanentes responsables de algunos de los efectos estrogénicos detectados en las aguas residuales tratadas (21). Todo esto lleva a aplicar nuevas tecnologías como tratamiento terciario, que permitan eliminar estas sustancias, garantizando de este modo una completa protección de la salud pública y del medio.

El ser humano no se libra del efecto de estas sustancias, afectándole especialmente el vertido de aguas residuales tratadas a masas de agua que posteriormente se destinan a su tratamiento para consumo humano. La legislación actual considera a estas masas de agua como zonas sensibles (22), regulando especialmente el vertido de nutrientes, sin embargo no hay consideraciones referentes a la presencia de este tipo de sustancias, por lo que no se controla su concentración en las aguas residuales y no se realizan tratamientos específicos para su eliminación. Este aspecto también afecta a usos de reutilización como la recarga de acuíferos, en especial la recarga directa.

A pesar de que el agua destinada a abastecimiento sufre todo un conjunto de tratamientos destinados a su potabilización, las tecnologías que se aplican hoy día no contemplan la eliminación de estas sustancias (23), en especial para el suministro a pequeñas comunidades cuyo recurso hídrico es el agua subterránea.

Son numerosos los trabajos que se están realizando para conocer cuál es la toxicidad de los diferentes compuestos catalogados como disruptores hormonales. Sin embargo la definición de la dosis tóxica no está muy establecida para compuestos concretos. Algunos trabajos realizados sobre disruptores hormonales, como el nonil-fenol, consideran que concentraciones en torno a 30 µg/L reducen considerablemente las poblaciones piscícolas (24), valores que pueden reducirse a ng/L, en el caso de los estrógenos naturales y artificiales presentes en las aguas, debido a su mayor actividad estrogénica (25). Para el caso del bisfenol A se han descrito efectos en diferentes especies, siendo las concentraciones significativamente mayores (mg/L) con respecto a los anteriores compuestos (26), algo concordante para los compuestos derivados, los cuales muestran, junto con el bisfenol A, actividad estrogénica en concentraciones 105 veces superiores al 17β-estradiol (27). Sin embargo, para ciertas especies, el bisfenol-A ha mostrado actividad estrogénica en concentraciones del orden de ng/L (Tabla 11).

TABLA 11. Estructura química de algunos disruptores endocrinos

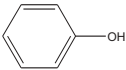
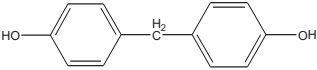
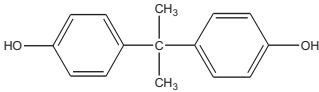
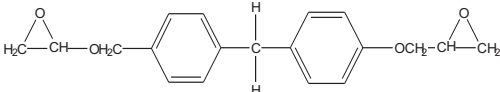
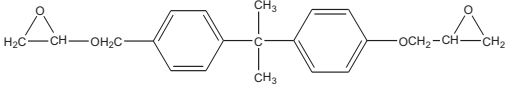
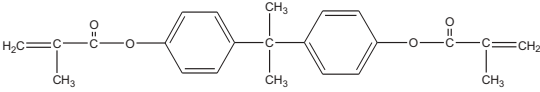
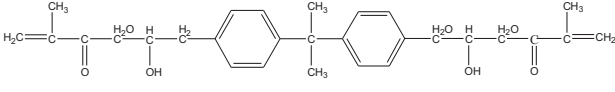
<i>Estructura Química</i> <i>Fórmula (peso molecular)</i>	<i>Compuestos</i>
 $C_6H_6O$ (94,11 g·Mol <sup>-1</sup> )	Fenol; Hidroxibenceno
 $C_{13}H_{12}O_2$ (200,23 g·mol <sup>-1</sup> )	Bisfenol F; 4,4'-metiliden difenol, 4,4'-bis (hidroxifenil)metano; difenilolmetano

TABLA 11. Estructura química de algunos disruptores endocrinos (cont.)

Estructura Química Fórmula (peso molecular)	Compuestos
 $C_{15}H_{16}O_2$ (228,29 g·mol <sup>-1</sup> )	Bisfenol A; 4,4'-isopropiliden difenol; 2,2-bis(4-hidroxifenil) propano; difenilopropano
 $C_{19}H_{20}O_4$ (312,36 g·mol <sup>-1</sup> )	Bisfenol F diglicidiléter; BFDGE; Bis(4-glicidil oxifenil)metano
 $C_{21}H_{24}O_4$ (340,41 g·mol <sup>-1</sup> )	Bisfenol A diglicidiléter; BADGE; Bis(4-glicidil oxifenil)propano
 $C_{23}H_{24}O_4$ (364,43 g·mol <sup>-1</sup> )	Bis-DMA, Bisfenol A dimetacrilato
 $C_{29}H_{36}O_8$ (512,590 g·mol <sup>-1</sup> )	Bisfenol A diglicidil dimetacrilato; bis-GMA; resina Bowen; 2,2'-bis[4 (2-hidroxi-3-metacrililoiloxi -propoxi) fenil]propano; bisfenol A glicerolato dimetacrilato

## 2. Catalogación del valor agronómico del agua

La presencia de metales pesados en el agua residual tratada puede limitar alguno de sus posibles usos. Cantidades elevadas de estas sustancias pueden dañar de forma irreversible a los cultivos, entrar en la cadena trófica o alcanzar el nivel freático apareciendo en las aguas subterráneas. Junto con los metales pesados pueden aparecer disueltos numerosos compuestos con influencia más o menos negativa en función del uso posterior del agua. Pueden aparecer diferentes nutrientes vegetales, tales como nitrato, amonio, potasio, fosfatos u otros como boratos, cloruros o sulfatos, que si bien son necesarios para las plantas, a unas concentraciones adecuadas, un exceso puede ser consecuencia de un desequilibrio nutricional o afectar negativamente al medio, causando problemas de contaminación. Otro de los factores a tener en cuenta es la salinidad, frente a la cual los cultivos reaccionan de diferente manera y que puede afectar negativamente a la producción. Este parámetro se relaciona con la tasa de adsorción de sodio (SAR) parámetro de alto interés agronómico.

Estos compuestos sí se reflejan en la propuesta de normativa sobre calidad de aguas a reutilizar, siendo necesario su control en el agua, en el caso de que el fango procedente de la EDAR supere los límites establecidos en el Real Decreto 1310/1990 (28).

## TECNOLOGÍAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

De acuerdo con lo indicado en la Tabla 3, las tecnologías para la recuperación de las aguas residuales deben conseguir la eliminación de parámetros físico-químicos, tales como sólidos en suspensión y turbidez, cumpliendo con requerimientos microbiológicos basados en análisis de huevos de nematodos y *E. coli*.

Para conseguir estos objetivos existen dos alternativas, como son los tratamientos físicoquímicos que incluyen la coagulación, sedimentación y filtración de los sólidos en suspensión, y, por otra parte, las tecnologías basadas en la utilización de membranas de Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF) Nanofiltración (NF) y Osmosis Inversa (OI). Ambas tecnologías requerirán, aunque por diferentes razones, la desinfección final del efluente.

### 1. Tratamiento físico-químico

El tratamiento físico-químico de las aguas residuales urbanas se basa en la aplicación de un coagulante para la desestabilización de los coloides, que tras su agregación serán separados mediante un sistema de decantación, ayudado de una filtración en medio granular posterior. Se ha propuesto en algunas instala-



ciones de depuración como tratamiento primario, alcanzando importantes rendimientos en la eliminación de materia particulada y DQO, así como mejorando considerablemente parámetros como la turbidez y el color del agua (29).

Independientemente de este tipo de usos, el tratamiento físico-químico puede utilizarse como primer paso dentro de los tratamientos terciarios previos a la reutilización de aguas (30).

Básicamente un tratamiento fisicoquímico está integrado por los siguientes procesos unitarios:

- Coagulación de las materias en suspensión mediante la utilización de un reactivo químico ( $\text{Cl}_3\text{Al}$ , Policloruro de Aluminio,  $\text{Cl}_3\text{Fe}$ , entre otros) en sucesivas etapas de mezcla y floculación mecánica o hidráulica.
- Sedimentación en unidades de decantación de diferentes tipos tales como recirculación, lecho de fangos o lamelar.
- Filtración mediante filtros por gravedad o a presión utilizando como medio filtrante lechos homogéneos o bicapa (arena, antracita, carbón activo).

Con esta configuración se obtienen los requerimientos de calidad relativos a parámetros fisicoquímicos, precisando posteriormente una desinfección para cumplir las garantías de calidad microbiológica.

## 2. Tratamiento con membranas

La filtración mediante membranas sigue el principio de la separación de partículas basada en el tamaño de poro y en su distribución. Según la membrana elegida se pueden separar sólidos suspendidos, bacterias, quistes y muchos otros parásitos, así como proteínas, pesticidas y ácidos húmicos entre otros (Figura 1), de forma que aplicando esta tecnología se puede obtener agua libre de patógenos y compuestos químicos.

Las membranas requieren una presión transmembrana para conducir el agua a través de las mismas, generándose dos corrientes, la del agua tratada o permeado y la del rechazo que contiene las partículas y los sólidos separados. La presión transmembrana requerida para operar las plantas puede conseguirse con presión o vacío.

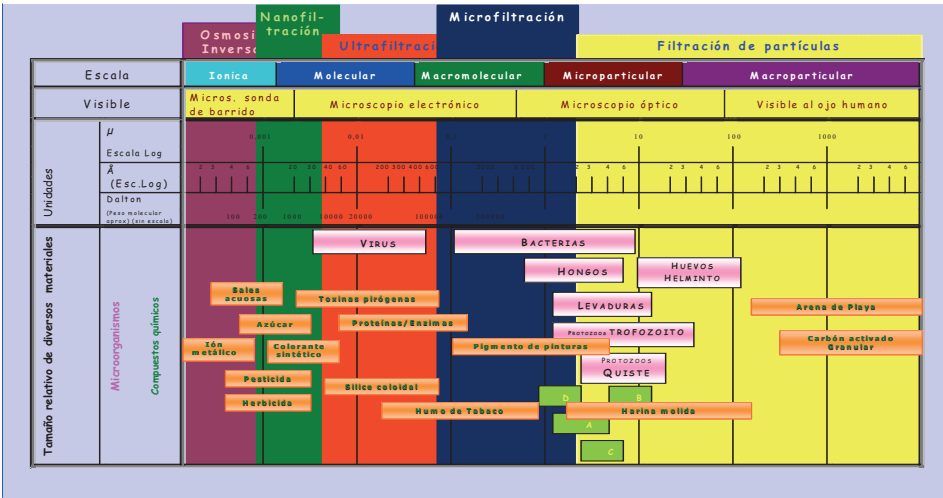


FIGURA 1. Espectro de filtración.  
A. Cryptosporidium. B. Quiste de Giardia. C. Células de glóbulos rojos. D. Escherichia coli.

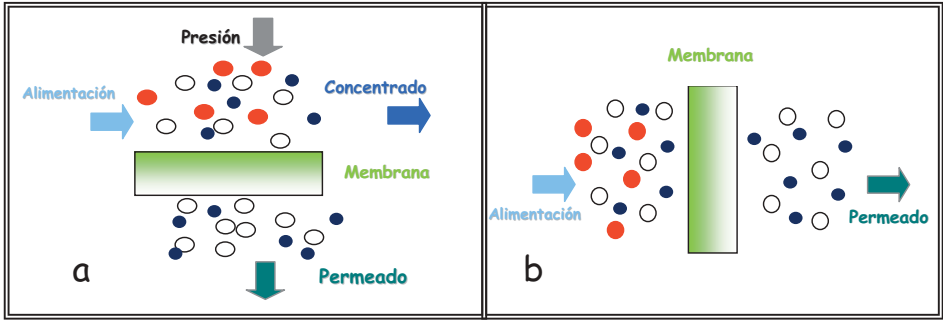


FIGURA 2. Esquema de (a) filtración tangencial y (b) filtración transversal.

La tecnología de membrana se ha desarrollado en los últimos años con fines industriales para obtener concentrados o para aprovechar el permeado. En este sentido su aplicación en el tratamiento de aguas presenta un gran interés basado principalmente en las nuevas necesidades que precisa este sector, tales como altos estándares de calidad, reducido impacto medioambiental de los efluentes tratados, mínimo espacio disponible para las instalaciones y amplio rango de aplicación, estando limitado su empleo por las altas inversiones y los elevados costes de operación que lleva asociados.

Otras ventajas de esta tecnología son que la separación se realiza de manera continua, se pueden combinar con otros procesos de separación creando procesos híbridos y el escalado es sencillo.

Como desventajas, presenta el inconveniente relativo al ensuciamiento de la membrana (*fouling*), lo que obliga a su limpieza para no reducir la producción y, periódicamente, a su sustitución.

Las membranas pueden clasificarse básicamente en el material, su ejecución y tamaño del poro, tal y como se indica en la Tabla 12.

TABLA 12. *Clasificación de las membranas*

<i>Clasificación</i>	<i>Tipos</i>
Según configuración:	PLANAS: — Enrollamiento Espiral (Spiral wound) — Placa y marco (Plate and frame) Tubulares: — Tubulares : $> 5 \mu$ — Capilares: 5 a $0,5 \mu$ — Fibra hueca (hollow fiber) $< 0,5 \mu$
Según estructura o morfología	Membranas simétricas Membranas asimétricas o composite
Según flujo (ver <i>Figura 2</i> )	TANGENCIAL (crossflow separation) TRANSVERSAL (dead-end filtration)
Según material	INTEGRALES: Acetato de celulosa, Polisulfonas, compuestos de polivinilo, así como materiales cerámicos o aceros inoxidables. COMPUESTAS O DE PELÍCULA FINA, diseñadas de capas de distintos materiales
Según tamaño de poro (ver <i>Figura 3</i> )	Microfiltración Ultrafiltración Nanofiltración Osmosis Inversa

## DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES

La desinfección de aguas se refiere al proceso que tiene como objetivo la inactivación de microorganismos patógenos presentes en el medio, minimizando la probabilidad de transmisión hídrica de enfermedades, y se consigue al provocar una alteración en los mecanismos celulares de los organismos (daños en la pared celular, alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma o inhibición de la actividad enzimática) (31). Se puede utilizar en combinación con cualquier sistema de tratamiento, aunque su empleo sólo tiene sentido cuando previamente se ha realizado un nivel de tratamiento adecuado.

Los procesos de desinfección se pueden llevar a cabo por métodos físicos (radiaciones ultravioleta, gamma, microondas, ultrasonidos, calor o sistemas de filtración) o químicos. Entre los productos químicos, el más empleado es el

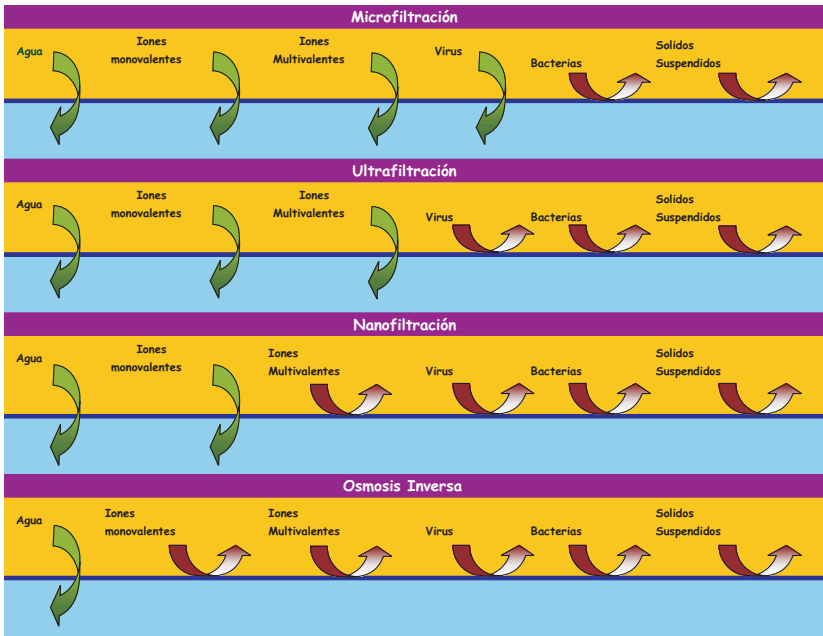


FIGURA 3. Retención de membranas según tamaño de poro.

cloro y sus derivados, seguido del ozono, aunque de manera minoritaria se usan otros compuestos como el bromo, yodo o el permanganato potásico. Por la vía de desinfección física, el método más habitual es la radiación UV.

Entre los factores que afectan a la eficiencia de la desinfección se encuentra el tipo y la concentración de microorganismos, la naturaleza y concentración del desinfectante, y el tiempo de contacto, temperatura, pH y contenido en materia orgánica.

En el tratamiento de aguas es muy importante conocer el tiempo de contacto adecuado y la dosis de agente desinfectante por un determinado período. El valor CT representa ambas funciones, es decir, combina la dosis de desinfectante y el tiempo que el agua ha estado expuesta a una mínima cantidad de desinfectante residual, siendo C la concentración final de desinfectante en mg/L y T el tiempo mínimo de exposición en minutos.

## 1. Desinfección química

### *Desinfección con cloro y derivados*

El cloro ha desempeñado una función muy importante protegiendo los sistemas de abastecimiento de las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua durante más de un siglo. Además, los desinfectantes basados en cloro son

los únicos que proporcionan una protección duradera, ya que previenen un nuevo crecimiento microbiano y proporcionan protección continua durante todo el proceso de distribución del agua.

La cloración del agua se puede llevar a cabo con diferentes compuestos, como puede ser el cloro gas, los hipocloritos o el dióxido de cloro que, previa reacción con agua, se transforman en el ácido hipocloroso que realmente realiza la función germicida:



En las Tablas 13 y 14 se presentan datos de CT para el cloro y alguno de sus derivados:

TABLA 13. Valores CT para la reducción de 99,9% de *Giardia lamblia* (32)

Desinfectante	pH	Temperatura (°C)					
		1	5	10	15	20	25
Cloro libre	6	165	116	87	58	44	29
	7	236	165	124	83	62	41
	8	346	243	182	122	91	61
	9	500	353	265	177	132	88
Dióxido de cloro	6-9	63	26	23	19	15	11
Cloraminas	6-9	3.800	2.200	1.850	1.500	1.100	750

TABLA 14. Valores CT para la inactivación de Virus (32)

Desinfectante	pH	Temperatura (°C)					
		0,5	5	10	15	20	25
Cloro libre	2	6	4	3	2	1	1
	3	9	6	4	3	2	1
	4	12	8	6	4	3	2
Dióxido de cloro	2	8,4	5,6	4,2	2,8	2,1	–
	3	25,6	17,1	12,8	8,6	6,4	–
	4	50,1	33,4	25,1	16,7	12,5	–
Cloraminas	2	1.243	857	643	428	321	214
	3	2.063	1.423	1.067	712	534	356
	4	2.883	1.988	1.491	994	746	497

Las ventajas del empleo del cloro se pueden esquematizar en:

Germicida potente. El cloro reduce el nivel de los microorganismos patógenos en el agua hasta valores casi imposibles de medir.

Cualidades residuales. El cloro produce una acción desinfectante residual sostenida que es «única entre los desinfectantes disponibles para el agua a gran escala». La persistencia del cloro residual mantiene el efecto germicida durante un tiempo muy superior a cualquier desinfectante alternativo.

Control químico. El cloro destruye el sulfuro de hidrógeno y elimina el amoníaco y otros compuestos nitrogenados que obstaculizan la desinfección.

En 1974, los científicos de la EPA (Environment Protection Agency) determinaron que el cloro reacciona con ciertos compuestos orgánicos formando trihalometanos (THM). Los estudios toxicológicos emprendidos sugirieron que era cancerígeno para animales de laboratorio, apareciendo el temor de que pudieran ser potencialmente cancerígenos para los humanos. En este contexto, la EPA decidió fijar límites reglamentarios para estos subproductos de la desinfección (SPD). El objetivo era reducir los niveles de SPD sin comprometer la protección microbiana, siendo uno de los mejores métodos la eliminación de los precursores orgánicos antes de la desinfección (mediante coagulación y clarificación, adsorción en carbón activo, o membranas).

El dióxido de cloro es un desinfectante más potente que el cloro y la cloramina ya que puede atravesar la membrana celular de la bacteria y destruirla.

El dióxido de cloro presenta las siguientes ventajas:

- Su capacidad germicida se produce en un amplio rango de pH (3 a 9) y esta capacidad aumenta con la acidez, siendo más potente que el cloro en un tiempo de contacto más corto.
- Excelente acción germicida contra los virus al ser absorbido y penetrar en la capa proteica de la cápside viral, reaccionando con su ARN.
- No reacciona con el nitrógeno amoniacal para formar aminas cloradas.
- No reacciona con material oxidable para formar compuestos organoclorados, destruyendo hasta un 30% de los precursores de THM.
- Desinfecta y oxida eficazmente actuando a buen nivel sobre la *Giardia* y *Cryptosporidium*.
- Funciona con dosis bajas en la etapa posterior a la desinfección sin necesidad de estaciones reforzadoras.
- No reacciona con el bromuro para formar bromatos o subproductos del bromo.

Entre las desventajas se encuentran:

- Se descompone en subproductos inorgánicos (clorito y, en menor grado, en clorato).

- Requiere equipo de generación y manejo de productos químicos en el lugar de su empleo.

Las cloraminas se obtienen por reacción de cloro y el amoníaco resultando un producto antiséptico muy estable cuya acción es menos potente que la del cloro, pero su persistencia en el agua es muy superior. Además presenta menores niveles de formación de THM y ácidos haloacéticos (AHA) y es un desinfectante eficaz de películas biológicas en los sistemas de distribución.

Entre las desventajas se encuentran:

- Formación de subproductos de desinfección, incluido compuestos basados en nitrógeno.
- Necesidad de mayor dosis y tiempo de contacto que el cloro.
- Función germicida viral y parasitaria cuestionable.
- Debido al amoníaco residual puede promover la formación de bacterias y algas.
- Mayor complejidad en las instalaciones de almacenamiento y dosificación.

### *Desinfección con ozono*

Es el oxidante más fuerte tras el flúor (Tabla 15). Su empleo en el campo de la desinfección no es grande pero el rechazo a los organoclorados (THM) que puede producir el cloro hace que se esté incrementando su uso en numerosas aplicaciones. Las especies oxidantes son el propio  $O_3$  y los radicales hidroxilo, los cuales tienen un alto potencial germicida pero una limitada capacidad de desinfección residual.

TABLA 15. *Potenciales redox de algunos oxidantes referidos al electrodo normal de hidrógeno (33)*

<i>Especie</i>	<i>E<sup>0</sup> (V, 25° C)</i>
Flúor	3,03
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Permanganato	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

En el agua residual actúa como oxidante de la materia orgánica e inorgánica, desinfecta inactivando virus, bacterias, protozoos y hongos, floclula sólidos en suspensión y elimina sustancias tóxicas. La escasa implantación del ozono como método de desinfección es debido a sus costes de inversión y operación, además de precisar una desinfección residual. El ozono no forma subproductos de desinfección organoclorados (SPD), pero pueden aparecer compuestos bromados si el agua contuviera bromuros, además de otros productos orgánicos como aldehídos o cetonas.

El ozono no puede ser transportado y debe ser generado en la propia EDAR, para lo cual se hace pasar una corriente de oxígeno o aire por una fuente generadora de corriente eléctrica (6 a 20 KV) a baja o media frecuencia.

El ozono presenta las siguientes ventajas:

- Excelente acción germicida contra los virus, protozoos (desactivación de la *Giardia* y el *Cryptosporidium*) y otros agentes patógenos.
- Desinfecta y oxida muy eficazmente.
- No genera ningún subproducto organoclorado.

TABLA 16. Valores CT para la inactivación por ozono de *Giardia lamblia* y de virus a diferentes temperaturas (32)

Desinfectante	Temperatura (°C)				
	5	10	15	20	25
Inactivación de Giardia					
0,5 log	0,32	0,23	0,16	0,12	0,08
1,0 log	0,63	0,48	0,32	0,24	0,16
1,5 log	0,95	0,72	0,48	0,36	0,24
2,0 log	1,3	0,95	0,63	0,48	0,32
2,5 log	1,6	1,2	0,79	0,60	0,40
3,0 log	1,9	1,4	0,95	0,72	0,48
Inactivación virus					
2,0 log	0,6	0,5	0,3	0,25	0,15
3,0 log	0,9	0,8	0,5	0,4	0,25
4,0 log	1,2	1,0	0,6	0,5	0,3

Entre las desventajas se encuentran:

- Se debe cubrir la demanda de oxigeno requerida por diversos compuestos reductores, lo que encarece el proceso.



- Genera subproductos de desinfección que incluyen aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, quininas, peróxidos y THM de bromo (bromoformo, ácidos acéticos de bromo, bromato, entre otros).
- No es un desinfectante persistente, por lo que se debe complementar con cloro o derivados.

### *Comparación de Métodos de Desinfección Química*

La Tabla 17 muestra la eficacia biocida, la estabilidad y el efecto del pH para los cuatro desinfectantes descritos, en la que se demuestra que el ozono (con un potencial de oxidación más fuerte) es el menos estable de los cuatro, mientras que las cloraminas tienen menor actividad biocida pero presentan un efecto residual más prolongado.

TABLA 17. *Eficacia biocida, estabilidad y efecto del pH (34)*

<i>Desinfectante biocida</i>	<i>Eficacia</i>	<i>Estabilidad</i>	<i>Efecto pH en la eficacia (pH = 6-9)</i>
Ozono	1	4	Poca influencia
Dióxido de cloro	2	2	Aumenta ligeramente al aumentar el pH
Cloro	3	3	Disminuye considerablemente al aumentar el pH
Cloraminas	4	1	Poca influencia

En la Tabla 18 se presenta el tiempo (t en minutos) necesario para que una concentración de desinfectante residual (C en mg/L) inactivo a un microorganismo.

TABLA 18. *Valores CT para distintos desinfectantes (34)*

<i>Microorganismo</i>	<i>Cloro pH 6-7</i>	<i>Cloramina pH 8-9</i>	<i>Dióxido cloro pH 6-7</i>	<i>Ozono pH 6-7</i>
E. coli	0,034-0,05	95-180	0,4-0,75	0,02
Poliomielitis 1	1,1-2,5	768-3740	0,2-6,7	0,1-0,2
Rotavirus	0,01-0,05	3806-6476	0,2-2,1	0,006-0,06
Fago f2	0,08-0,18	Nd	Nd	Nd
Quistes de Giardia. lamblia	47-150	2200*	26*	0,5-0,6
Quistes de Giardia. Muris	30-630	1400	7,2-18,5	1,8-2,0

\*99,99% de inactivación a un pH 6-9; 90% de inactivación a un pH 7 y 25° C, Nd no hay datos.

Los desinfectantes más efectivos son aquellos que tienen los valores de CT más bajos, destacando en primer lugar el ozono seguido del dióxido de cloro.

En la Tabla 19 se muestra la efectividad de los desinfectantes sobre diversos microorganismos.

TABLA 19. Valores CT para microorganismos problemáticos (34)

Microorganismo	Cloro (pH 6-7)	Cloramina (pH 8-9)	Dióxido cloro (pH 6-7)	Ozono (pH 6-7)
Giardia 0,5 log de inactivación pH 6-9 5° C	16-47	365	4,3	0,3
Cryptosporidium, pH 7, 25° C	7,200 1 log inactivación	7,200 2 log inactivación	78 1 log inactivación	5-10 2 log inactivación

## 2. Desinfección con Radiación Ultravioleta

Es un método físico de desinfección que actúa transfiriendo energía electro-magnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo (ADN o ARN). La radiación UV es absorbida por los nucleótidos, promoviendo la formación de enlaces entre nucleótidos adyacentes, con lo que se forman dímeros, siendo los más comunes los de tiamina-tiamina, también suelen ocurrir de citosina-citosina, citosina-tiamina y del uracilo; la formación de un número suficiente de dímeros impide que el microorganismo se replique. Así la inactivación de los microorganismos mediante UV es función de la longitud de onda que absorbe su ADN. En el caso de la *E. coli*, alcanza su punto máximo en las longitudes de onda cercanas a 265 y 220 nm, por lo que es conveniente que la salida de la lámpara coincida con un punto de máxima inactivación que se encuentra cerca de 265, como es el caso de las lámparas empleadas convencionalmente cuya longitud de onda irradiada se sitúa en 254 nm. La aplicación práctica de la desinfección UV se basa en la capacidad germicida de la zona de onda corta o UVC ( $200 \text{ nm} < \lambda < 280 \text{ nm}$ ) y de la onda media o UVB ( $280 \text{ nm} < \lambda < 315 \text{ nm}$ ) (Figura 4).

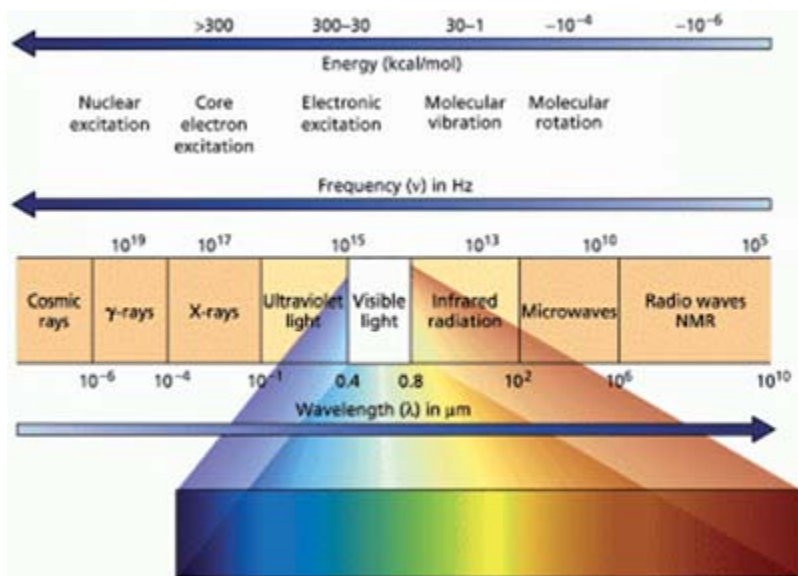


FIGURA 4. Escala expandida del espectro electromagnético.

Existen mecanismos de reparación de los ácidos nucleicos denominados fotorreactivación o fotorreparación de la tiamina, en los que una enzima fotorreactiva usa una radiación reactivadora entre 300 y 500 nm para activar la partición del dímero. Esta capacidad de regeneración se da en bacterias y otros microorganismos, pero nunca en virus, y su intensidad está relacionada con la extensión de daño UV, la exposición a luz, el pH y la temperatura del agua. El fenómeno de fotorreactivación requerirá que la exposición del microorganismo a la luz reactivadora no se demore más de dos a tres horas desde su incativación, teniendo en cuenta que el grado de reactivación es una función inversamente proporcional a la dosis de radiación utilizada.

Los factores que afectan a la acción germicida de la luz UV dependen de la absorción por parte de los microorganismos, todo lo cual va a depender de las propiedades del propio fluido y de las sustancias presentes en el mismo:

- Sólidos en suspensión (SST), pueden crear sombras que eviten la incidencia de la radiación UV sobre los microorganismos. Se limita a 30 mg/L.
- Transmitancia: o capacidad de transmitir la potencia de radiación en el agua. La mínima recomendable es del 55%.
- Turbidez limitada a 5 NTU.
- Partículas minerales: Hierro, manganeso, calcio y magnesio pueden producir incrustaciones en las paredes de la lámpara y absorber parte de la radiación UV. Limitación a 0,3 mg/L.

- Compuestos orgánicos: El ácido húmico y los taninos absorben parte de la radiación UV, por lo que disminuyen la potencia disponible para desinfección microbiológica.

Otros aspectos que influyen en la capacidad germicida son el estado del equipo, el envejecimiento de las lámparas y la estabilidad del suministro eléctrico.

Para determinar la cinética de inactivación microbiana por UV se emplea la Ley de Chick:

$$N = N_0 \cdot e^{-k I t}$$

N = Concentración de microorganismos después de la aplicación de la luz UV en NMP/100 mL.

N<sub>0</sub> = Concentración inicial en NMP/100 mL.

k = Constante del ritmo de inactivación.

I = Intensidad de luz UV en mW/cm<sup>2</sup>.

t = tiempo de exposición en segundos.

La tasa de inactivación microbiana varía en función del microorganismo y de la longitud de onda de la radiación UV: En general, las bacterias son menos resistentes que los virus y estos, a su vez, menos que las esporas de bacterias, mientras que los quistes y oocitos de protozoos son los patógenos microbianos más resistentes. En la Tabla 20 se presenta un resumen de la inactivación por UV observada, usando lámparas de baja presión en patógenos virales, bacterianos y protozoos, así como grupos microbianos indicadores (35).

TABLA 20. Dosis UV en MWs/cm<sup>2</sup> para inactivar una población microbiana en 1 Log (90%) y 2 Log (99%) (35)

<i>Microorganismos</i>	<i>Reducción logaritmica</i>		<i>Microorganismos</i>	<i>Reducción logaritmica</i>	
	1	2		1	2
BACTERIAS			Coliformes fecales	3,4	6,8
Bacillus anthracis	4,5	8,7	Salmonella enteritidis	4	7,6
Bacillus subtilis, esporas	12	22	Salmonella paratyphi	3,2	–
Bacillus subtilis	7,1	11	Salmonella typhi	2,1	–
Campylobacter jejuni	1,1	–	Salmonella typhimurium	3	–
Clostridium tetani	12	22	Shigella dysenteriae	2,2	4,2
Corynebacterium diphtheriae	3,4	6,5	Shigella flexneri (paradysenteriae)	1,7	3,4
Escherichia coli	3	6,6	Shigella sonnei	3	5
Klebsiella terrigena	2,6	–	Staphylococcus aureus	5	5

TABLA 20. *Dosis UV en MWs/cm<sup>2</sup> para inactivar una población microbiana en 1 Log (90%) y 2 Log (99%) (35) (cont.)*

<i>Microorganismos</i>	<i>Reducción logaritmica</i>		<i>Microorganismos</i>	<i>Reducción logaritmica</i>	
	1	2		1	2
Legionella pneumophila	0,9	2,8	Streptococcus faecalis	4,4	6,6
Sarcina lutea	20	26,4	Streptococcus pyogenes	2,2	–
Mycobacterium tuberculosis	6	10	Vibrio cholerae (V. comma)	–	6,5
Pseudomonas aeruginosa	5,5	10,5	Yersinia enterocolitica	1,1	–
VIRUS					
Colifago MS-2	18,6	–	Virus de la influenza	3,6	6,6
Bacteriófago F-específico	6,9	–	Virus de la poliomelitis	5-8	14
14Hepatitis A	7,3	–	Rotavirus	6-15	15-40
PROTOZOOS					
Giardia lamblia	82	–	ALGAS		
Cryptosporidium parvum	80	120	Verde-azul	300	600
LEVADURAS					
Saccharomyces cerevisiae	7,3	13,2	Chlorella vulgaris	12	22

La radiación ultravioleta presenta las siguientes ventajas:

- No precisa almacenamiento químico ni equipo para su manipulación o alimentación.
- No tiene subproductos de desinfección identificados.

Entre las desventajas se encuentran:

- No tiene actividad residual.
- Elevados costes de inversión, mantenimiento y operación.
- La acción de desinfección puede verse comprometida por variables, tales como la transmitancia, contenido en minerales, longitud de onda de radiación y la estabilidad del suministro eléctrico.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) U.S.E.P.A. U.S. Agency of International Development 1992. «Manual of Guidelines for Water Reuse», EPA/625/R-92/004 September, Washington D.C.
- (2) WORLD HEALTH ORGANIZATION (1989): «Health Guidelines for the use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture. Report of a WHO Scientific Group, Geneva, Switzerland».
- (3) Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- (4) CEDEX. Ministerio de Medio Ambiente (2000): «Propuesta de calidades mínimas exigidas para la reutilización directa de efluentes depurados según los distintos usos posibles, así como de aspectos relativos a la metodología, frecuencia de muestreo y criterios de cumplimiento de los análisis establecidos para incluir en una normativa de carácter estatal».
- (5) R. B. DEAN y E. LUND (1981): «Water Reuse: problems and solution». Academic Press, Londres.
- (6) U.S.E.P.A., EPA 832-F-99-062 September 1999, Office of Water Washington D.C.
- (7) COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITY (1999): «Community Strategy for Endocrine Disrupters», COM 706 final.
- (8) W. BIRKETT, y J. N. LESTER (2003): «Endocrine Disrupters in Wastewater and Treatment Processes», Lewus Publishers, Londres.
- (9) S. M. RHIND (2002): «Endocrine Disrupting Compounds and Farm Animals: Their Properties, Actions and Routes of Exposure». *Domestic Animal Endocrinology*. **23**: 179-187.
- (10) P. L. WHITTEN (1992): *Advances in Modern Environmental Toxicology*, **21**: 311.
- (11) M. QUINN y E. ALLEN (1995): *Br. Medical Journal*, **311**: 1391.
- (12) J. PAJARINEN; P. LAIPPALA; A. PENTTILA y P. J. KARHUNEN (1997): *Br. Medical Journal*, **314**: 13.
- (13) D. ROY, M. PALANGAT, C. W. CHEN, R. D. THOMAS, J. COLERANGLE, A. ATKINSON y Z. J. YAN (1997): «Biochemical and Molecular changes at the cellular level in response to exposure to environmental estrogen-like chemical», *Journal of Toxicology & Environmental Health*, **50** (1), 1-29.
- (14) R. M. MERRIL y O. W. BRAWLEY (1997): *Epidemiology*, **8**: 126.
- (15) C. SULTAN, P. BALAGUER, B. TEROUANNE, V. GEORGET, F. PARIS, C. JEANDEL, S. LUMBROSO, y J. C. NICOLAS (2001): «Environmental xenoestrogens, antiandrogens and disorders of male sexual differentiation», *Molecular and Cellular Endocrinology*, **178**: 99-105.
- (16) EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION (2001): «Establishing the List of Priority Substances in the Field of Water Policy», Decision n.º 2455/2001/EC.
- (17) M. FÜRHACKER, S. SCHARF y H. WEBER (2000): «Bisphenol A: emissions from point sources», *Chemosphere*, **41**: 751-756.
- (18) H. ASAKURA, T. MATSUTO y N. TANAKA (2004): «Behavior of endocrine-disrupting chemical in leachate from MSW landfill sites in Japan» *Waste Management*. **24**: 613-622.
- (19) C. MANFRED, B. STRENN, E. SARACEVIC y N. KREUZINGER (2004): «Adsorption of Bisphenol-A, 17 $\beta$ -estradiol and 17  $\alpha$ -ethinylestradiol to Sewage Sludge», *Chemosphere*, **56**: 843-851.
- (20) T. WINTGENS, M. GALLINKEMPER y T. MELIN (2004): «Removal of endocrine-disrupting compounds with membrane processes in wastewater treatment and reuse», *Water Science Technology*, **50**: 1-8.

- (21) T. P. ROGERS-GRAY (2001): «Exposure of juvenile roach (*Rutilus rutilus*) to treated sewage effluent induces dose-dependent and persistent disruption in gonadal duct development», *Environmental Science & Technology*, **35**: 462.
- (22) Resolución de 28 de abril de 1995, por la que se aprueba el plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (1995-2005). B.O.E.
- (23) AWWA (1999): «Water Quality and Treatment, A handbook of community water supplies», McGraw Hill, New York.
- (24) A. R. BROWN, A. M. RIDDLE, N. L. CUNNINGHAM, T. J. KEDWARDS, N. SHILLABEER, y T. H. HUTCHINSON (2003): «Predicting the effects of endocrine disrupting chemical on fish population» *Human and Ecological Risk Assessment*. **9**: 761-788.
- (25) H. SEGNER, K. CAROLL, M. FENSKE, C. R. JANSSEN, G. MAACK, D. PASCOE, C. SCHÄFERS, G. F. VANDENBERGH, M. WATTS y A. WENZEL (2003): «Identification of endocrine-disrupting effects in aquatic vertebrates and invertebrates: report from the European IDEA project» *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **54**: 302-314.
- (26) C. STAPLES, P. B. DORN, G. M. KLECKS, S. T. O'BLOACK y L. R. HARRIS (1998): «A review of the environmental fate, effects and exposures of Bisphenol A», *Chemosphere*, **36**: 2149-2173.
- (27) K. SATOH, K. OHYAMA, N. AOKI, M. LIDA y F. NAGAI (2004): «Study on anti-androgenic effects of bisphenol A diglycidyl ether (BADGE), bisphenol F diglycidyl ether (BFDGE) and their derivatives using cells stably transfected with human androgen receptor», *AR-EcoScreen. Food and Chemical Toxicology*. **42**: 983-993.
- (28) Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de lodos de depuración. B.O.E. n.º 262.
- (29) P. M. NACHEVA, L. TORRES-BUSTILLOS, E. RAMÍREZ-CAMPEROS, S. LÓPEZ-ARMENTA y L. CARDOSO-VIGUEROS (1996): «Characterization and coagulation-flocculation treatability of Mexico city wastewater applying ferric chloride and polymers» *Water Science Technology*, **34**: 235-247.
- (30) E. DIAMADOPOULOS y C. VLACHOS (1996): «Coagulation-Filtration of a secondary effluent by means of pre-hydrolyzed coagulants» *Water Science Technology*, **33**: 193-201.
- (31) E. R. BLATCHLEY III, B. A. HUNT, R. DUGGIRALA, J. E. THOMPSON, J. ZHAO, T. HALABY, R. L. COWGER, C. M. STRAUB y J. E. ALLEMAN (1997): «Effects of disinfectants on wastewater effluent toxicity» *Water Research*. **31**: 1581-1588.
- (32) USEPA (1991): Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources, 1989.
- (33) O. LEGRINI, E. OLIVEROS y A. M. BRAUN (1993): *Chem. Rev.*, **93**: 671-698.
- (34) R. A. DEININGER, A. ANCHETA, A. ZIEGLER (1998): «Desinfección con dióxido de cloro». Simposio regional sobre calidad del agua: desinfección efectiva. CEPIS/OPS. Lima.
- (35) H. B. WRIGHT and W. L. CAIRNS (1998): Trojan Technologies, «Luz Ultravioleta» Simposio regional sobre calidad del agua: desinfección efectiva. CEPIS/OPS. Lima.